

ESTUDO DE BETÕES ECO-EFICIENTES ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DE CINZAS VOLANTES DE BIOMASSA

ELISABETE R. TEIXEIRA^{1*}, DIOGO CUNHA¹, AIRES CAMÕES¹, FERNANDO G. BRANCO²

1: CTAC, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho,
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal
*elisabeterodriguest@gmail.com

2: ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra,
Rua Luís Reis Santos – Pólo II da Universidade, 3030-788 Coimbra, Portugal

Palavras-chave: Betão, Carbonatação, Cinzas volantes de biomassa, Resistência mecânica

Resumo *A indústria do betão é, na actualidade, constantemente desafiada a minimizar o consumo de recursos naturais, matérias-primas e energia, assim como melhorar a performance ambiental dos materiais que produz. O cimento Portland é um dos materiais que contribui significativamente para a emissão de dióxido de carbono para atmosfera e, consequentemente, para o aquecimento global. Por outro lado, são utilizadas na sua produção grandes quantidades de matérias-primas e energia. Deste modo, é uma mais-valia a sua substituição nos materiais de construção, tais como o betão, por materiais que mantenham as mesmas propriedades mecânicas e de durabilidade, mas permitindo produzir um material mais sustentável.*

Um estudo experimental foi desenvolvido com o intuito de se avaliara influência de cinzas volantes de biomassa nas propriedades de betões com elevados teores de cinzas volantes. As cinzas volantes de biomassa foram usadas como reservatório de alcalinidade, para se tentar perceber se estas permitem minorar os problemas relacionados com este tipo de betões, nomeadamente o problema da carbonatação, e consequentemente da corrosão das infraestruturas metálicas. Foram estudadas propriedades frescas e endurecidas, tais como: espalhamento, resistências mecânicas e carbonatação.

Os resultados mostram que a adição, ao conteúdo total do ligante, de apenas 0,5% de cinzas volantes de biomassa, conduz a uma melhoria em termos de qualidade e durabilidade do betão, quando comparado com um betão com elevado teor de cinzas e um betão convencional (só com cimento como ligante). Deste modo, com a utilização de cinzas volantes de biomassa, é possível a produção de materiais de construção com baixo teor de cimento, com resistências mecânicas satisfatórias e duráveis, mas com uma melhoria significativa na performance ambiental destes materiais.

1. INTRODUÇÃO

O betão é um dos materiais mais usados no sector da construção, principalmente pelo facto de apresentar diversas vantagens, nomeadamente ao nível da resistência e durabilidade [1]. Contudo, o betão apresenta um considerável impacto no ambiente, uma vez que, necessita de grandes quantidades de recursos naturais e energia para a sua produção. Para além disso, é sabido que a produção de um dos materiais mais usados no betão, o cimento Portland, conduz a emissões elevadas de CO₂ para atmosfera, fenómeno que está relacionado com o problema dos gases com efeito de estufa e com o aquecimento global do planeta [2].

Hoje em dia, as questões relacionadas com a sustentabilidade económica, ambiental e social são muito importantes. Por isso, o sector da construção enfrenta a necessidade de encontrar um conjunto de soluções que possam ser implementadas para minimizar os problemas relacionados com a sustentabilidade do betão [3].

Uma das possíveis soluções passa pela redução da quantidade de cimento usado na produção do betão, com recurso à utilização de materiais que possuam características semelhantes às do cimento, mas que apresentem um melhor desempenho ambiental. Um material com estas características é a pozolana, que oferece uma redução das emissões de CO₂ globais [4], reduz o custo do betão, altera a trabalhabilidade do betão fresco e, em alguns casos, aumenta a durabilidade do betão [1].

As cinzas volantes de carvão (CVC) são o tipo de pozzolana artificial mais usada na produção do betão [1]. As CVC possuem diversas vantagens quando comparadas com o cimento, como por exemplo um menor calor de hidratação, são um sub-produto da combustão de carvão e mais baratas do que o cimento [2]. Hoje em dia, existe betão que é produzido com a substituição de 40% do cimento por cinzas volantes de carvão. Contudo, o aumento da substituição do cimento por cinzas, em grandes proporções, pode conduzir a problemas relacionados com um atraso do ganho da resistência mecânica inicial e com a diminuição da resistência contra a corrosão dos elementos metálicos, provocada por exemplo por carbonatação [5].

Diversos países apostaram na produção de energia eléctrica através de fontes renováveis, como o uso da biomassa consistindo, nomeadamente, nos resíduos florestais, resultantes da manutenção das florestas e das indústrias de pasta de papel. A utilização destes resíduos conduz a um aumento da produção energética renovável e promove o desenvolvimento sustentável do sector da energia, através da redução das emissões directas de gases de efeito estufa associados a este sector. Por outro lado, existe uma quantidade considerável de biomassa florestal recebida pelas indústrias da celulose e papel, que não é apropriada para a produção dos produtos resultantes deste sector. Esta biomassa é considerada como um resíduo que tem valorização material, através da sua valorização térmica, por combustão, realizada na própria indústria, uma vez que possui conteúdo energético suficientemente elevado para recuperação de energia. No entanto, a combustão da biomassa produz cinzas, que requerem uma estratégia de gestão adequada [6].

Em Portugal, as cinzas volantes de biomassa (CVB) são consideradas resíduos sólidos, sem qualquer tipo de valorização material, sendo o seu destino final a colocação em aterro [7,8]. Contudo, a colocação destas cinzas em aterro conduz a sérios problemas económicos, ambientais e de sustentabilidade [4]. Existem alguns países que fazem a valorização material destas cinzas, por meio da sua utilização nos solos agrícolas ou florestais. No entanto, na maioria dos casos, sem nenhuma forma de controlo [9].

As CVB podem ser usadas como um material substituto do cimento, sendo que existem estudos que mostram bons resultados quando estas cinzas são utilizadas para a produção de betão [6,10–12]. Contrariamente, às cinzas de carvão, existem algumas questões técnicas, barreiras comerciais e preocupações sobre a disponibilidade e quantidade de cinzas de biomassa, que constituem um obstáculo para a sua utilização industrial [6,10].

As cinzas volantes de biomassa possuem um teor alcalino superior ao das cinzas volantes de carvão, sendo que a sua utilização pode ser uma solução para contrariar a diminuição de compostos alcalinos de betões com elevado volume de adições. Assim, essas cinzas podem ser utilizadas para fornecer

um teor de cálcio superior às misturas de betão. Este facto pode contribuir para minimizar os problemas relacionados com a diminuição do pH e dos compostos alcalinos e, consequentemente, a corrosão das armaduras de estruturas do betão armado. Permite ainda a adoção de uma opção mais sustentável para a gestão das cinzas volantes de biomassa.

O objetivo do presente estudo é avaliar o efeito de cinzas volantes de biomassa nas propriedades de betões com elevados teores de cinzas volantes. Foram testadas diferentes composições, com substituição da massa total de ligante em 0,5, 1,25 e 5% por cinzas de biomassa em betões com teor de cinzas volantes de carvão. Foram estudadas propriedades frescas e endurecidas, tais como: espalhamento, resistências mecânicas e carbonatação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

2.1. Caracterização dos materiais utilizadas

Na preparação das diferentes composições de betão foram usados 3 tipos de agregados: meia areia-rolada 0-4 mm proveniente das minas de barqueiros, uma brita granítica 4-8 mm e uma brita granítica 6-12 mm, cuja distribuição granulométrica se encontra na Figura 1.

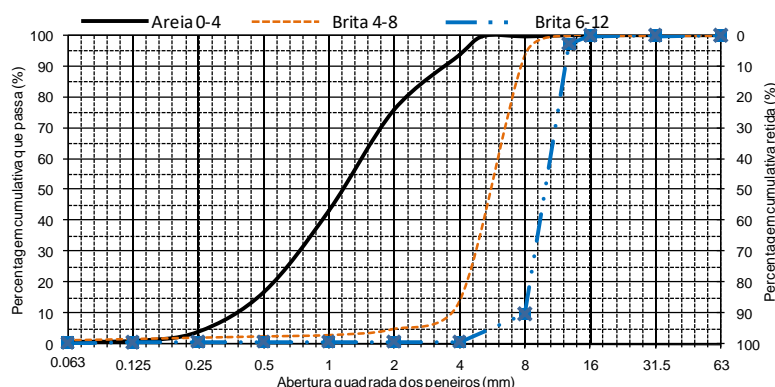


Figura 1. Curva granulométrica dos agregados utilizados nestes estudo.

Em termos de ligantes, foi utilizado um cimento CEM I 42.5 R (Outão, Secil) e dois tipos de cinzas volantes: uma cinza volantes resultante da combustão de carvão e outra resultante da combustão de biomassa. Foi realizada uma caracterização química e física destes três materiais, que se encontra apresentada em [13].

2.2. Composições de betão

Um grupo de composições de betão foi preparado com a utilização das cinzas volantes de biomassa como reservatório de alcalinidade em betões com elevado conteúdo de cinzas volantes de carvão, representado na Tabela 1. A dosagem total de ligante utilizada foi de 350 kg/m³. Foram produzidos betões com 50% em massa de substituição do cimento, com uma razão água/ligante (A/L) de 0.35 e com recurso à adição de superplastificante (SP). Com o intuito de se perceber o efeito sinérgico das duas cinzas, as formulações de betões com elevado teor de cinzas foram comparadas com um betão convencional (100% de cimento e razão A/L=0,5). O conteúdo de cinzas volantes de biomassa utilizado foi de 0,5, 1,25 e 5% do conteúdo total de ligante.

Tabela 1. Composições de betão.

Nomenclatura	Cimento	CVC	CVB	SP
	kg/m ³			%
REF	350.0	-	-	0.0
CVC	175.0	175.0	-	0.5
CVCCVB0.5	175.0	173.5	1.9	0.7
CVCCVB1.25	175.0	170.6	4.4	0.7
CVCCVB5	175.0	160.0	17.8	0.2

2.3. Ensaio em estado fresco

Foi realizado um ensaio de abaixamento de acordo com a norma portuguesa [14].

2.4. Ensaio em estado endurecido

Os provetes de betão foram moldados de acordo com a norma portuguesa [15]. Após 24 h, os provetes foram colocados numa câmara húmida, imersos em água até serem testados. Foram estudadas propriedades tais como: resistências mecânicas, absorção de água e carbonatação, após 28 e 90 dias de cura.

Um dos ensaios realizados aos provetes de betão foi o ensaio de resistência à compressão, que consistiu em levar os provetes até à rotura numa prensa hidráulica (ELEAuto Test), registando-se a carga máxima suportada pelo provete e calculando-se a resistência à compressão do betão, como especificado na norma portuguesa [16]. Foram utilizados provetes de 10x10 cm de aresta.

A realização do ensaio de absorção de água por imersão foi baseado na especificação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) [17], em provetes com 10x10 cm de aresta. A absorção de água por imersão é obtida através da Equação 1.

$$A_i = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad (1)$$

Onde,

m₁ – Massa do provete saturado ao ar, expresso em gramas;

m₂ – Massa hidrostática do provete saturado, expressa em gramas;

m₃ – Massa do provete seco, expressa em gramas.

O ensaio de carbonatação foi realizado por um método acelerado com o objectivo de medir a resistência à penetração do CO₂ do betão. Este teste realizou-se de acordo com a especificação do LNEC [18]. Após preparação, as amostras foram colocadas numa câmara com humidade relativa, temperatura e concentração de CO₂ controlada. As amostras foram retiradas com uma periodicidade de 30 dias, e foi cortada uma amostra de cerca de 1 cm de espessura. Nas superfícies de fratura, mediu-se a profundidade de carbonatação após pulverização das mesmas com uma solução de fenolftaleína [18].

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1. Ensaio em estado fresco

O ensaio de abaixamento do betão permite perceber qual a trabalhabilidade do betão. Na Figura 2 encontram-se apresentados os resultados obtidos para as misturas realizadas. Como se pode observar, a mistura de referência apresenta o menor valor de abaixamento. Este resultado deve-se ao facto de, para as restantes misturas, ter sido necessário adicionar superplastificante para que os

betões com elevado teor de cinzas volantes apresentassem propriedades semelhantes aos do betão convencional, o que levou a um aumento no abaixamento para as restantes misturas. Através da figura, nota-se que as cinzas de biomassa não produziram um efeito significativo na trabalhabilidade dos betões.

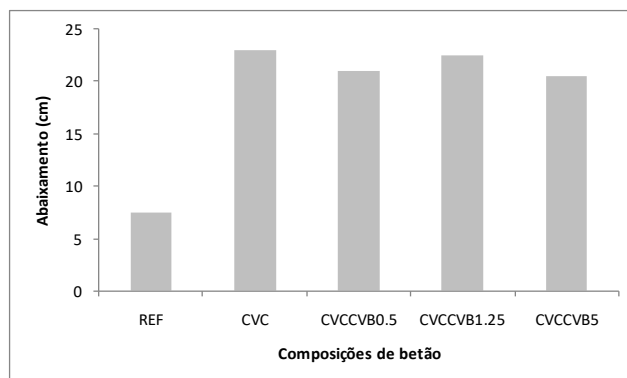


Figura 2. Abaixamento das misturas de betão

3.2. Resistência à compressão

Na Figura 3 encontram-se apresentados os valores das resistências à compressão dos provetes testados ao fim de 28 e 90 dias de cura. Os valores apresentados consistem numa média de valores de 3 amostras para cada mistura e idade de cura.

Da análise da Figura 3, constata-se que a adição de cinzas volantes de carvão, associada à diminuição da razão água/ligante, conduz a um ganho em termos de resistência à compressão para as duas idades de cura. Contudo, a adição de cinzas volantes, apesar de em pequenas quantidades, tem um efeito significativo no ganho de resistência. Com o aumento do seu conteúdo no betão, ocorre uma diminuição do ganho de resistência, sendo os melhores valores obtidos para a amostra com 0,5%*m* de CVB. Ao contrário dos 28 dias de cura, em que a resistência à compressão da amostra CVC e da amostra CVCCVB0.5 apresentam valores semelhantes, aos 90 dias de cura a amostra com cinzas de biomassa apresenta um aumento significativo deste parâmetro, sendo neste caso a amostra que apresenta os valores mais elevados para a resistência à compressão.

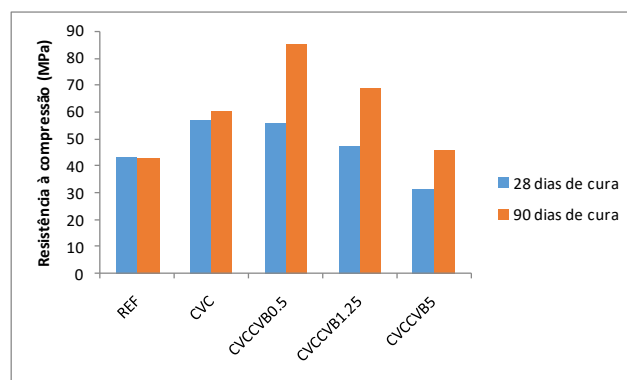


Figura 3. Resistência à compressão dos provetes de betão

3.3. Absorção de água por imersão

A Figura 4 demonstra os valores da porosidade aberta obtidos pelo teste de absorção de água por

imersão. Uma vez que este teste permite medir o volume dos poros que é ocupado por água num estado saturado [19]. Através da figura, observa-se que os menores valores para absorção de água, para as duas idades de cura, foram obtidos para a mistura CVCCVB0.5, seguindo-se a mistura CV, CVCCVB1.25, CVCCVB5 e a REF.

A mistura de referência apresenta uma maior absorção de água, devido ao facto de apresentar uma maior razão água/ligante (0,5), enquanto que as restantes amostras apenas apresentam uma razão A/L de 0,35. Uma maior razão água/ligante conduz à produção de betões com uma maior porosidade [20,21].

A mistura CVCCVB0.5 apresenta os menores valores devido ao facto da sílica amorfa da cinza de biomassa e do seu teor de cálcio ser mais elevado do que as cinzas de carvão, que funcionam como reservatório alcalino, resultando numa boa sinergia entre as duas cinzas e que leva a uma melhor atividade pozolânica, conduzindo à produção de um betão mais denso [12,19]. Apesar de uma boa sinergia entre as duas cinzas, é notório que o aumento do conteúdo em cinza de biomassa leva à produção de materiais mais porosos. Isto deve-se ao facto das cinzas volantes de biomassa serem bastante higroscópicas [22,23].

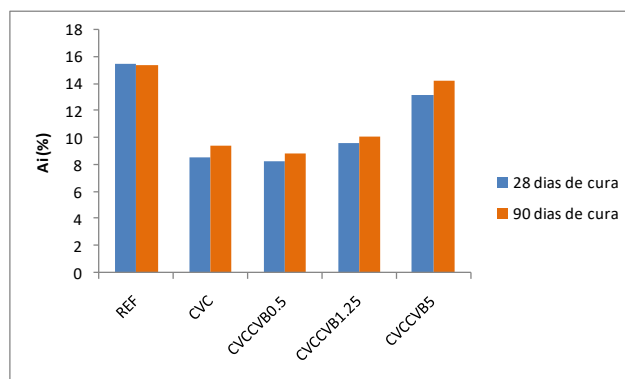


Figura 4. Absorção de água por imersão

3.4. Carbonatação

A carbonatação dos materiais de construção resulta de um ataque químico, provocado por alguns gases atmosféricos, como por exemplo CO_2 . O CO_2 , usualmente, difunde-se na forma gasosa na solução do sistema poroso, nas fissuras existentes na zona de transição interfacial, o que conduz à neutralização dos compostos alcalinos e a uma diminuição do pH, o que leva à destruição da proteção passiva e consequente corrosão das armaduras [24]. O ensaio realizado consistiu num teste acelerado, com o objectivo de se medir a resistência à penetração do CO_2 do betão endurecido.

Na Figura 5 encontram-se os valores dos coeficientes de carbonatação das diferentes formulações de betão, para as duas idades de cura (28 e 90 dias).

No que diz respeito, aos 28 dias de cura, a mistura de referência apresentou o menor coeficiente de carbonatação ($2,87\text{mm}/\text{dia}^{0.5}$), o que mostra que um betão tradicional apresenta uma maior resistência à carbonatação do que betões com elevados teores de cinza, seguindo-se das misturas CVCCVB0.5, CVC, CVCCVB1.25 e CVCCVB5, respectivamente.

Uma maior resistência por parte de betões só com cimento pode dever-se à hidratação do cimento, onde os compostos hidratados alite e belite, reagem com a água, formando compostos hidratados de cálcio e portlandite. Na presença de materiais pozolânicos, o consumo de portlandite na reacção

pozolânica causa uma diminuição da alcalinidade do betão, o que leva a uma maior suscetibilidade à carbonatação [24].

A amostra que apresentava o menor teor de cinza de biomassa apresentou o segundo menor coeficiente de carbonatação. Uma vez mais se verifica a sinergia entre as duas cinzas, o que leva a uma maior resistência face ao fenómeno da carbonatação. A profundidade de carbonatação do betão é maior quando a quantidade de Ca(OH)_2 presente na mistura for menor. Sendo que o betão com baixo conteúdo de cinza de biomassa não apresenta um elevado conteúdo de sílica amorfa adequada para desencadear reações de hidratação secundárias que consumam Ca(OH)_2 da hidratação primária do cimento, e que este betão apresenta uma menor porosidade (Figura 4), existe uma contribuição para a redução da profundidade média da zona de carbonatação da mistura [25]. Apesar desta cinza ter um contributo positivo para a durabilidade do betão, verificou-se que, com o aumento do seu teor nas misturas, ocorre uma diminuição na resistência à carbonatação.

Relativamente aos resultados obtidos para os betões com 90 dias de cura, observou-se que a mistura CVCCVB0.5 apresentou o menor valor para o coeficiente de carbonatação, seguida da mistura: CVC, CVCCVB1.25, REF, CVCCVB5, com 4,62, 5,04, 5,54, 7,90, 8,66 e 8,67 $\text{mm/dia}^{0.5}$, respetivamente. Uma maior resistência da mistura CVCCVB0.5, neste caso superior ao do betão de cimento, justificada por uma baixa e lenta actividade pozolânica e uma baixa permeabilidade desta mistura face ao CO_2 , o que contribui para a redução da profundidade média da zona de carbonatação das misturas [25]. É importante também salientar que as cinzas volantes de biomassa possuem uma maior conteúdo de cálcio e uma maior alcalinidade do que as cinzas de carvão, o que pode compensar a quantidade de cálcio usada para a reacção pozolânica e que é necessária para a hidratação do cimento. Ou seja, estas cinzas, em quantidades reduzidas, funcionam como um reservatório alcalino [12]. Tal como se observou para os 28 dias de cura, um aumento no conteúdo de cinza volante de biomassa na mistura conduz a uma menor resistência face à carbonatação.

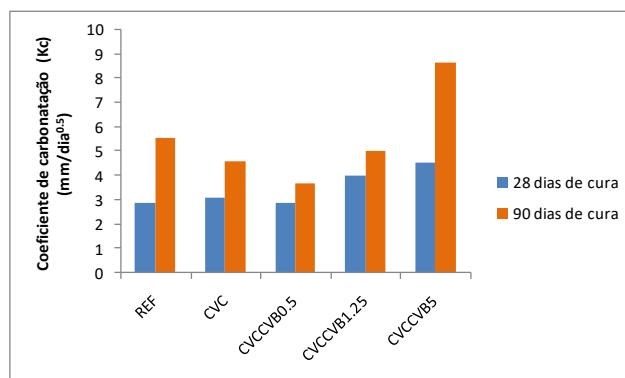


Figura 5. Coeficientes de carbonatação das diferentes formulações

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi estudado o efeito de cinzas volantes de biomassa nas propriedades de betões com elevados teores de cinzas volantes de carvão. Verificou-se que o aumento da dosagem de cinzas volantes de biomassa conduz a uma diminuição na resistência à compressão, observando-se um atraso no ganho das resistências aos 28 dias, devido essencialmente às reações pozolânicas das duas cinzas em estudo.

No ensaio de absorção de água por imersão, observou-se que o betão convencional apresentou uma maior porosidade, o que se deveu essencialmente ao facto deste betão possuir uma maior razão

água/ligante. Por outro lado, a mistura com 0,5%*m* de cinza volantes de biomassa apresentou o menor valor para a porosidade, o que indica uma boa sinergia entre as duas cinzas e a produção de um betão mais denso. Contudo, o aumento da dosagem de cinza de biomassa conduz a uma maior absorção de água.

A carbonatação do betão é influenciada por factores externos, mas também pela composição da mistura e sua permeabilidade aos gases responsáveis por este fenómeno. Aos 28 dias, o betão convencional apresentou a maior resistência face à carbonatação, seguindo da mistura com 0,5%*m* de CVB. Aos 90 dias, a mistura CVCCVB0,5 foi a mistura que apresentou uma maior resistência. Este resultado indica que a presença desta cinza mais alcalina, em pequenas quantidades, parece ter uma boa sinergia com as cinzas volantes de carvão, agindo como um reservatório de alcalinidade, o que dificulta a diminuição do pH do betão. Por outro lado, conduz a uma maior impermeabilidade face ao CO₂ e, conseqüentemente, aumenta a resistência deste betão às reacções de carbonatação.

Tendo em conta que hoje em dia a sustentabilidade do betão é muito importante, e que a redução do cimento para a sua produção é muito importante, pode afirmar-se, que a utilização de cinzas volantes de biomassa (mesmo que em baixas quantidades) contribui para a produção de betões com propriedades mecânicas e de qualidade semelhantes ao betão convencional, mas com uma maior durabilidade e com uma melhor performance ambiental. A produção deste betão implica benefícios económicos, ambientais e sociais e resulta num betão eco-eficiente de alto rendimento. Por outro lado, a valorização material deste resíduo (cinzas volantes de biomassa) com a sua aplicação em materiais de construção é uma forma mais sustentável de gestão final deste resíduo, o que conduz uma vez mais a uma maior sustentabilidade no sector energético e no sector da produção de pasta de papel.

AGRADECIMENTOS

Os autores querem agradecer à FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia – Portugal) e ao programa doutoral Eco-Construction and Rehabilitation por ajudarem no suporte financeiro através da bolsa com a referência PD/BD/52661/2014. Este trabalho foi também financiado pelo FEDER, através de fundos do programa “Competitvity Factors Operational Programme” - COMPETE e por fundos nacionais através do projecto POCI-01-0145-FEDER-007633 e pelo programa operacional regional CENTRO2020 no âmbito do projecto CENTRO-01-0145-FEDER-000006.

REFERÊNCIAS

- [1] N. Kabay, M.M. Tufekci, A.B. Kizilkanat, D. Oktay, Properties of concrete with pumice powder and fly ash as cement replacement materials, *Constr. Build. Mater.* 85 (2015) 1–8. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.026.
- [2] C. Meyer, The greening of the concrete industry, *Cem. Concr. Compos.* 31 (2009) 601–605. doi:10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010.
- [3] S. Demis, J.G. Tapali, V.G. Papadakis, An investigation of the effectiveness of the utilization of biomass ashes as pozzolanic materials, *Constr. Build. Mater.* 68 (2014) 291–300. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.06.071.
- [4] K. Celik, C. Meral, A.P. Gursel, P.K. Mehta, A. Horvath, P.J.M. Monteiro, Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder, *Cem. Concr. Compos.* 56 (2015) 59–72. doi:10.1016/j.cemconcomp.2014.11.003.
- [5] A.M. Rashad, An exploratory study on high-volume fly ash concrete incorporating silica fume subjected to thermal loads, *J. Clean. Prod.* 87 (2015) 735–744. doi:10.1016/j.jclepro.2014.09.018.
- [6] R. Barbosa, N. Lapa, D. Dias, B. Mendes, Concretes containing biomass ashes: Mechanical,

- chemical, and ecotoxic performances, *Constr. Build. Mater.* 48 (2013) 457–463. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.07.031.
- [7] E.R. Teixeira, L.A.C. Tarelho, T.C.S.R. Silva, D.F.R. Silva, R.C.. Modolo, Physical-chemical characteristics of ash flows in a biomass thermal power plant, in: 21st Eur. Biomass Conf. Exhib., Copenhagen, 2013.
- [8] L.A.C. Tarelho, A.M.S.L. Coelho, E.R. Teixeira, R. Rajamma, V.M. Ferreira, Characteristics of ashes from two portuguese biomass co-generation plants, in: 19th Eur. Biomass Conf. Exhib., 2011: pp. 6–10.
- [9] L.A.C. Tarelho, E.R. Teixeira, D.F.R. Silva, R.C.E. Modolo, J.J.F. Silva, Characteristics, management and applications of ashes from thermochemical conversion of biomass to energy, in: World Bioenergy 2012, Conf. Exhib. Biomass Energy, Jonkoping, Sweden, 2012.
- [10] R. Rajamma, L. Senff, M.J. Ribeiro, J. a. Labrincha, R.J. Ball, G.C. Allen, V.M. Ferreira, Biomass fly ash effect on fresh and hardened state properties of cement based materials, *Compos. Part B Eng.* 77 (2015) 1–9. doi:10.1016/j.compositesb.2015.03.019.
- [11] S. Wang, A. Miller, E. Llamazos, F. Fonseca, L. Baxter, Biomass fly ash in concrete: Mixture proportioning and mechanical properties, *Fuel*. 87 (2008) 365–371. doi:10.1016/j.fuel.2007.05.026.
- [12] C.B. Cheah, M. Ramli, The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview, *Resour. Conserv. Recycl.* 55 (2011) 669–685. doi:10.1016/j.resconrec.2011.02.002.
- [13] E.R. Teixeira, A. Camões, F.G. Branco, L. Tarelho, Biomass and coal fly ash as cement replacement on mortar properties, in: ICCS16 - II Int. Conf. Concr. Sustain., Madrid, Spain, 2016: pp. 1–12.
- [14] NP EN 12350-8, Ensaios do betão fresco - Parte8: Betão autocompactável. Ensaio de espalhamento., (2010).
- [15] NP EN 12390-2, Ensaios de betão endurecido - Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica, (2003).
- [16] NP EN 12390-3, Ensaios do betão endurecido - Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio, (2003).
- [17] LNEC E 394_1993, Determination of the absorption of water immersion, (1993).
- [18] LNEC E 391_1993, Betões - Determinação da resistência à carbonatação, (1993).
- [19] K. Ganesan, K. Rajagopal, K. Thangavel, Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 1675–1683. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.06.011.
- [20] I. Türkmen, Influence of different curing conditions on the physical and mechanical properties of concretes with admixtures of silica fume and blast furnace slag, *Mater. Lett.* 57 (2003) 4560–4569. doi:10.1016/S0167-577X(03)00362-8.
- [21] H.N. Atahan, O.N. Oktar, M.A. Taşdemir, Effects of water-cement ratio and curing time on the critical pore width of hardened cement paste, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 1196–1200. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.08.011.
- [22] N. Chusilp, C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 3352–3358. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.06.030.
- [23] A.U. Elinwa, S.P. Ejeh, Effects of the Incorporation of Sawdust Waste Incineration Fly Ash in Cement Pastes and Mortars, *J. Asian Archit. Build. Eng.* 3 (2004) 1–7.

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaabe/3/1/3_1_1/_article.

- [24] R. Reis, R. Malheiro, A. Camões, M. Ribeiro, Carbonation Resistance of High Volume Fly Ash Concrete, *Key Eng. Mater.* 634 (2014) 288–299. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.634.288.
- [25] C.B. Cheah, M. Ramli, Mechanical strength, durability and drying shrinkage of structural mortar containing HCWA as partial replacement of cement, *Constr. Build. Mater.* 30 (2012) 320–329. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.12.009.